

УДК 550.388.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО РАДИОЗОНДИРОВАНИЮ ИОНОСФЕРЫ С ИСЗ “КОСМОС 1809” ПРИ НАЛИЧИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

© 2012 г. Н. П. Данилкин<sup>1</sup>, С. В. Журавлев<sup>1</sup>, Н. Г. Котонаева<sup>1</sup>, М. М. Анишин<sup>2</sup>, М. А. Кураев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета, г. Москва

<sup>2</sup> Южный Федеральный Университет, г. Ростов-на-Дону

e-mail: nickdaniilkin8@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.11.2009 г.

После доработки 21.09.2011 г.

Высказана гипотеза о происхождении и предложена модель специфических образований электронной плотности в полярной ионосфере в виде относительно тонких вертикальных или наклонных слоев или листов. Моделирование подтвердило, что основные особенности, отмеченные в эксперименте, успешно отображаются в предложенной модели, а именно, значительное групповое запаздывание на низкочастотном конце следа, расщепление на обыкновенный и необыкновенный лучи, наличие резкой границы у предельной частоты следа. Отмечена аналогия со спорадическим слоем *E<sub>s</sub>* типа “с”.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

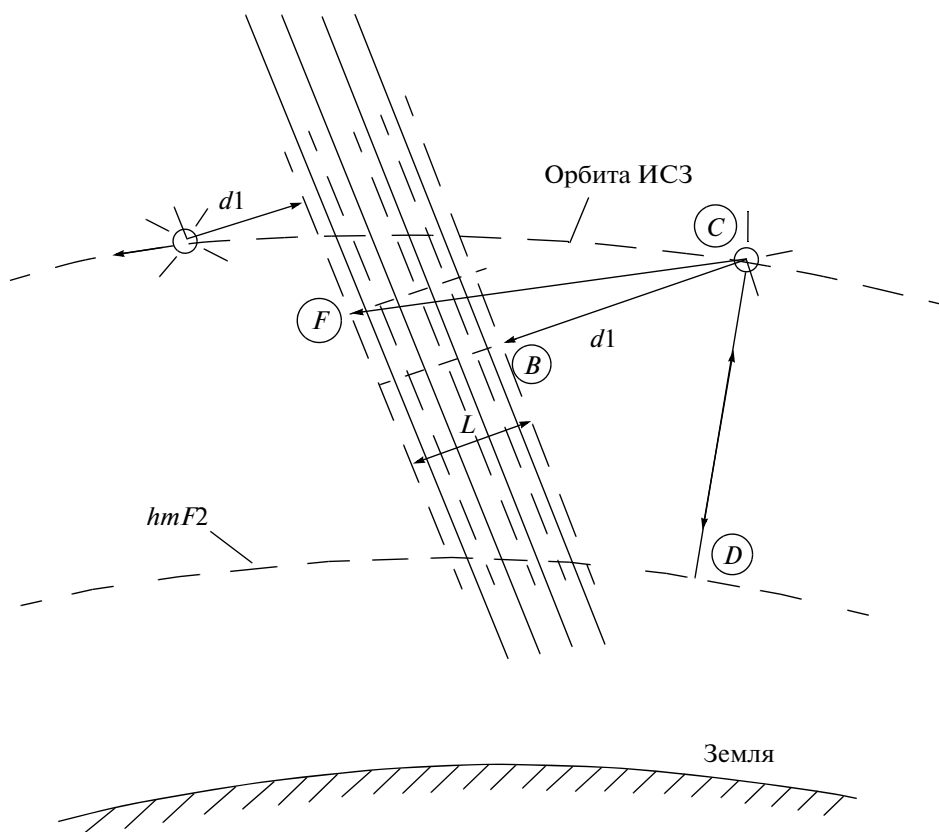
Во время эксперимента по радиозондированию внешней ионосферы с искусственного спутника Земли (ИСЗ) “Космос 1809” на ионограммах, полученных в высоких широтах, были обнаружены дополнительные следы. Авторы условно назвали их “крабами” [Данилкин и др., 1990]. Анализ этих, впервые зарегистрированных в нашей стране следов горизонтальных или близких к ним наклонных отражений при вертикальном зондировании [Данилкин и др., 1991, 1995] и их поведение на серии ионограмм привели авторов к мысли, что имеет место отражение или рассеяние радиоволн от вертикальных или слабо наклонных неоднородностей электронной плотности типа “стенки”. Возможно, что это результат отражения от вертикальных (слабо наклонных) листов с повышенной по сравнению с фоном электронной плотностью, имеющих некоторую толщину, значительно меньшую, чем протяженность области повышенной электронной плотности по двум другим осям. Похожие образования были описаны в работах [King et al., 1967; Petrie, 1963; Calvert and Schmid, 1964] как диффузные отражения (или рассеяние) от неоднородностей экваториальной ионосферы.

Выводы авторов работ [Данилкин и др., 1990, 1991, 1995] иллюстрирует рис. 1. На ионограмме зафиксированы различные отражения, полученные, с одной стороны, при “классическом” внешнем зондировании ионосферы (по линии CD), с другой стороны, – при отражении или рассеянии

радиоволн (по линиям *CB* или *CF*) от структуры, которую авторы условно назвали “полярной стенкой”. При приближении ИСЗ к стенке (*d1* – расстояние между спутником и стенкой) область отражения перемещается подобно тени вдоль по стенке. При прохождении ИСЗ сквозь стенку тень сомкнется с ним, а затем снова будет удаляться по мере удаления спутника от стенки. Существенным является то, что отражающая область из-за наклона стенки располагается выше ИСЗ, когда он находится по одну сторону от нее, и ниже – когда он находится по другую сторону. Причем высота области отражения, изменяющаяся при удалении ИСЗ от стенки, угол наклона стенки, толщина самой стенки (*L*) и некоторые другие геофизические параметры (например, *hmF2* – высота максимума слоя *F2* ионосферы и др.) могут быть определены в ходе эксперимента.

Анализируя эксперимент, авторы [Данилкин и др., 1991, 1995] отмечают, что “почти вертикальные стенки” имели большую протяженность (~900 км по высоте, ~1500 км по широте). Их толщина была порядка 80–100 км. Последовательные события фиксируются ориентировочно на 15-ти ионограммах, каждая из которых регистрировалась в течение 6 с. Весь сценарий разыгрывался приблизительно в течение ~2 мин, на удалениях от стенки ~±1000 км.

Представляемая работа имеет своей целью дать с помощью расчетов на соответствующих моделях подтверждение справедливости высказанной гипотезы о существовании в полярной



**Рис. 1.** Орбита ИСЗ, который находился выше высоты максимума ионосферы, проходящая сквозь слегка наклоненную стенку ионосферной неоднородности.

ионосфере вертикальных неоднородностей электронной плотности типа “стенки” и возможности их мониторинга методом спутникового радиозондирования с определением геофизических параметров. Инструментом моделирования является вычисление траекторий зондирующих ионосферу сигналов бортового ионозонда на основе современных траекторных расчетов и сопоставление результатов расчетов с ионограммами, которые послужили основанием для выдвижения гипотезы.

## 2. МОРФОЛОГИЯ ИОНОГРАММЫ С ПОЛЯРНОЙ СТЕНКОЙ

Типичная ионограмма одного из эпизодов прохождения ИСЗ сквозь полярную стенку представлена на рис. 2. Ионограмма была зафиксирована 18 мая 1987 г. в 14:17 (московское декретное время) при радиозондировании ионосферы с ИСЗ “Космос 1809” в точке с координатами: широта – 64.8°N, долгота – 187.3°E, высота – 968.1 км.

Экспериментальная ионограмма на рис. 2 содержит все основные отраженные от ионосферы сигналы, на основе изучения которых высказана гипотеза, представленная на рис. 1. Хорошо видны следы  $z$ - и  $x$ -компонент.  $O$ -компонента на

большей части ионограммы значительно ослаблена или зашумлена. Частота отсечки  $o$ -луча не видна, но может быть легко восстановлена из частот отсечки  $z$ - и  $x$ -лучей в соответствии с соотношением

$$f_h = (1 - (f_o s / f_x s)^2) f_x s,$$

где  $f_h = f_x s - f_z s$  – гирочастота электронов,  $f_o s$ ,  $f_x s$  и  $f_z s$  частоты отсечки  $o$ -,  $x$ -,  $z$ - компонент магниторасщепленного сигнала. В области критических частот наблюдается сильное диффузное рассеяние радиоволн. Определение критических частот затруднено. След отражения от Земли виден только в ограниченной области частот. След отражения от полярной стенки виден хорошо. На этом следе есть две характерные особенности: рост групповой задержки на его низкочастотном конце и предельная частота отражения от полярной стенки. Видимо, здесь можно увидеть определенную аналогию с отражением радиоволн от спорадического слоя  $E_s$  типа “ $c$ ” и двумя характеристиками электронной плотности – частотой отражения и частотой экранировки.

На ионограмме рис. 2 вполне отчетливо видно некоторое разделение горизонтального участка следа отражения от полярной стенки на две части –



Рис. 2. Типичная для северных широт ионограмма внешнего зондирования ионосферы, имеющая необычный след, который интерпретирован как след отражения от слегка наклонной стенки повышенной электронной концентрации на фоне обычного вертикального  $N(h)$ -профиля.

верхнюю и нижнюю. В качестве предположения на этом этапе можно заключить, что речь идет о двух компонентах магниторасщепленного сигнала — т. е. о следах отражения от стенки обыкновенного и необыкновенного лучей.

### 3. ГИПОТЕЗА

Рассмотренная выше морфология ионограммы с полярной стенкой побуждает нас высказать в качестве нулевого приближения следующую гипотезу. Будем предполагать, что имеет место вертикальная или слабонаклонная стенка (лист), для которой характерны следующие закономерности:

- внутри листа (стенки) электронная концентрация резко и однородно увеличивается в последовательности вложенных друг в друга слоями плазменных частот, гарантирующих отражение радиоволн в диапазоне частот зондирования (ориентировочно до 16 МГц);

- имеет место групповая задержка на низкочастотном конце отражения от стенки и отсутствует групповая задержка на высокочастотном конце следа отражения.

В этой гипотезе находят объяснение обе вышеприведенные особенности следа отражения от полярной стенки. Действительно, групповая задержка на низкочастотном конце есть следствие относительно медленного нарастания электронной плотности от внешней границы до середины

внутри стенки. Конечная или, пользуясь условной аналогией со слоем  $E_s$ , предельная частота отражения от стенки определяется максимальной плотностью электронов внутри стенки. Отсутствие групповой задержки на высокочастотном конце отражения от стенки есть следствие, с одной стороны, достаточно сильного градиента электронной плотности, с другой стороны, — ограниченной толщины самой стенки.

Представляется достаточно очевидным, что моделирование на основе построения лучевых траекторий может подтвердить или опровергнуть предлагаемую гипотезу.

### 4. МОДЕЛЬ СТЕНКИ

Изучение распространения радиоволн будем проводить в вертикальной плоскости двух переменных ( $x$ ;  $h$ ), поэтому изменение электронной концентрации (или, соответственно, плазменной частоты) внутри стенки будем описывать соотношением

$$D_n = \Delta \exp(-(x - x_0)^2 / L_x^2 - (h - h_0)^2 / L_h^2). \quad (1)$$

Здесь  $L_x$  и  $L_h$  — размер неоднородности,  $x_0$  и  $h_0$  — координаты ее центра,  $\Delta$  есть величина возмущения в процентах относительно начального  $N(h)$ -профиля. Неоднородность, заданная такой формулой, представляет собой систему вложенных друг в друга замкнутых линий уровня — линий

одинаковой электронной плотности [Данилкин и Котонаева, 2009]. Подбором коэффициентов выбирается такая кривая, чтобы в зонах, где происходит отражение или рассеяние радиоволн различие между формами стенки и кривой было незначительно с точки зрения вычислительного эксперимента [Авдюшин и др., 2005].

## 5. ТЕХНИКА РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИЙ РАДИОВОЛН

Моделирование проводилось по программе расчета траекторий различного типа в анизотропной неоднородной ионосфере. Для расчета лучевых траекторий используется прием, получивший в отечественной литературе название – метод характеристик. В этом случае система характеристических уравнений [Кравцов и Орлов, 1971], вытекающая из уравнения эйконала, для двумерно-неоднородной анизотропной ионосферы в полярной системе координат, в которой  $r$  – радиальное расстояние от центра Земли,  $\varphi$  – полярный угол, отсчитываемый в плоскости большого круга от точки расположения ИСЗ, принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r} \left\{ k_\varphi - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_\varphi} \right\}; \quad \frac{dr}{d\tau} = k_r - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_r}; \\ \frac{dk_\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{r} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \varphi} - k_\varphi \frac{dr}{d\tau} \right\}; \quad \frac{dk_r}{d\tau} = \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial r} + k_\varphi \frac{d\varphi}{d\tau}; \quad (2) \\ \frac{dP}{d\tau} &= \mu^2; \quad \frac{dP'}{d\tau} = \mu^2 - v \frac{\partial \mu^2}{\partial v} - u \frac{\partial \mu^2}{\partial u}. \end{aligned}$$

Здесь в качестве переменной, параметризующей траекторию, выбран некоторый параметр  $\tau$ , связанный с длиной дуги луча  $\sigma$  соотношением  $d\tau = \frac{d\sigma}{\mu}$ . Остальные переменные имеют следующий смысл:  $P, P'$  – фазовый и групповой пути,  $(k_r, k_\varphi)$  – физические полярные компоненты волнового вектора  $\mathbf{k}$ ,  $u = (f_h/f)^2$ ,  $v = (f_n/f)^2$ , где  $f_h, f, f_n$  – гирочастота электронов, рабочая и плазменная частоты соответственно.

Действительная часть показателя преломления  $\mu$  в магнитоактивной бесстолкновительной плазме выглядит следующим образом:

$$\mu^2 = \frac{2v(1-v)}{2(1-v) - u \sin^2 \beta \pm \sqrt{u^2 \sin^4 \beta + 4u(1-v)^2 \cos^2 \beta}},$$

где  $\beta$  – угол между волновым вектором  $\mathbf{k}$  и вектором магнитного поля  $\mathbf{h}$ .

Начальные условия для системы уравнений (2) могут быть сформулированы в точке расположения ИСЗ с координатами  $(\varphi, r)$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi &= 0; \quad k_\varphi = \mu_0 \cos \delta; \\ r &= R_0 + Z_{sp}; \quad k_r = -\mu_0 \sin \delta, \end{aligned}$$

где  $\delta$  – угол вылета траектории с ИСЗ,  $R_0$  – радиус Земли,  $Z_{sp}$  – высота спутника над землей,  $\mu_0$  – показатель преломления в точке расположения спутника.

Для решения системы, применяется метод Рунге-Кутты-Фельберга пятого порядка с переменным шагом. Отличительная особенность этого метода состоит в том, что он позволяет автоматически выбирать и в дальнейшем корректировать шаг интегрирования в процессе построения траектории. Невозмущенный высотный  $N(h)$ -профиль электронной концентрации в месте расположения ИСЗ над землей описывается Международной справочной моделью ионосферы IRI-2001 в узловых точках с заданным шагом по высоте  $\Delta h$ .

Полученные таким образом значения электронной концентрации аппроксимируются по высоте одномерным кубическим сплайном, который позволяет определить электронную концентрацию в точках с произвольной высотой  $h$ . При этом обеспечивается непрерывность как самой функции  $N(h)$ , так и ее производных. Последнее необходимо для реализации выбранного метода вычисления траектории. Предусмотрена коррекция полученного профиля по следующим параметрам: высота максимума –  $hmF2$  и критическая частота  $foF2$  слоя  $F2$ . Затем в невозмущенный высотный профиль  $N(h)$  вносится неоднородность следующим образом:

$$\begin{aligned} N(x, h) &= N(h)(1 + 0.01D_n) = N(h) \times \\ &\times (1 + 0.01\Delta \exp(-(x-x_0)^2/L_x^2 - (h-h_0)^2/L_h^2)), \\ N(x, h) &\approx 1.24 \times 10^4 f_n^2(x, h) \end{aligned}$$

при  $f$  – в МГц и  $N$  –  $\text{см}^{-3}$ .

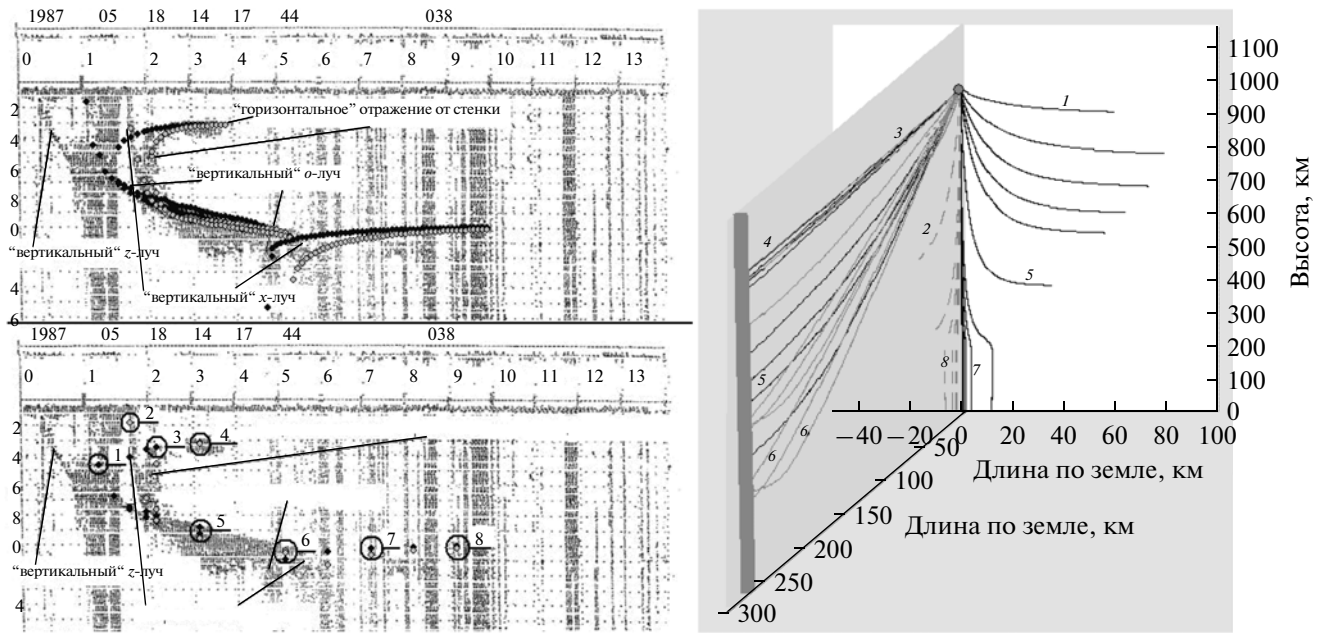
В восстановленной таким образом ионосфере происходит определение траекторий различного типа. Задача решается для двумерного случая с учетом влияния магнитного поля Земли рассчитанного по методу, описанному в работе [Барабашов и Вертоградов, 1981].

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Построение следов на ионограмме рис. 2 обеспечивается тремя различными видами траекторий распространения зондирующих радиосигналов:

– вертикальные траектории отражения от Земли,

– вертикальные с учетом распространения в гиротропной среде отражения от внешней ионосферы,



**Рис. 3.** Сравнение экспериментальной (см. рис. 2) и вычисленной ионограмм. Слева вычисленные групповые глубины и дальности для обыкновенного луча — зачерненными кружками, а необыкновенного — незачерненными. Внизу и справа — соответствие между вычисленными траекториями и соответствующими точками на экспериментальной ионограмме.

— горизонтальные или слабонаклонные траектории отражения от стенки.

Результаты моделирования на основе рассмотрения этих трех механизмов представлены на рис. 3. Правый фрагмент на рис. 3 показывает на ограниченном числе частот — которые использованы для того, чтобы излишне не загромождать рисунок — эти вычисленные траектории. При отражении радиоволн во внешней ионосфере для высот ИСЗ “Космос 1809” радиоволны различных частот отклоняются от вертикального распространения в плоскости магнитного меридиана. Эта плоскость показана как плоскость листа на правом фрагменте. Здесь обыкновенный луч отклоняется вправо (сплошные линии), а необыкновенный — влево (штриховые линии). Такая же ситуация имеет место и для радиоволн, которые отражаются от Земли. Отражение от полярной стенки происходит в плоскости, которая содержит ИСЗ и которая перпендикулярна плоскости стенки, т.е. расположена так, чтобы на стенке происходило зеркальное отражение радиоволн. По одной ионограмме нельзя вычислить угол между плоскостью магнитного меридиана и плоскостью, содержащей отраженные от полярной стенки сигналы. Поэтому на рис. 3 этот угол поставлен произвольно. Фрагмент рисунка только подчеркивает, что почти всегда эти плоскости не совпадают, а горизонтальная проекция отклонения “вертикальных” лучей при движении спутни-

ка к стенке есть величина одного порядка с расстоянием до стенки.

На левых фрагментах показаны результаты расчетов обеих характеристических волн на фоне подложки, в качестве которой использована ионограмма с рис. 2. На верхнем левом фрагменте черные точки — обыкновенная компонента, белые точки — необыкновенная компонента. Расчеты произведены через 0.1 МГц. На нижнем левом фрагменте цифрами показаны те точки на вычисленной ионограмме, которые соответствуют траекториям выделенных лучей с правого фрагмента рисунка.

Анализ результатов моделирования, который иллюстрируется рис. 3, позволяет сделать следующие выводы

— Предложенная гипотеза хорошо подтверждается на основе вычисления траекторий радиоволн, так как достигнуто практически полное совпадение экспериментальной и вычисленной ионограмм.

— Сигнал, отраженный от стенки, действительно состоит из двух компонент (обыкновенного и необыкновенного следов). На низкочастотном конце оба следа приобретают значительное групповое запаздывание, связанное с тем, что траектория перестает быть горизонтальной, и в отраженном от стенки следе появляются наклонные лучи. С увеличением частоты — после прохождения точек перегиба — групповая задержка этих наклонных лучей (на рис. 3 наклон-

ные лучи показаны под номерами 5 и 6) также увеличивается и, приближаясь к групповым задержкам “вертикальных” лучей, как бы накладывается на следы отражения при вертикальном распространении. Это приводит к расширению основного следа отражения от ионосферы на ионограмме и создает иллюзию “диффузности” следа. Отметим, что это, естественно, не исключает наличия собственно диффузности обоих основных следов.

– Максимальная частота отражения от стенки на горизонтальном участке следа определяет максимальную концентрацию электронов внутри следа и может быть определена. Дальнейшее увеличение частоты радиоволн приводит к сквозному прохождению зондирующих сигналов сквозь стенку.

## 7. ВЫВОД

Метод радиозондирования ионосферы на основе бортовых ионозондов, пересекающих вертикальные или слабо наклонные арктические структуры в области высот выше высоты главного максимума ионосферы, сопровождаемый расчетом траекторий радиоволн, позволяет определять базовые геофизические характеристики этих структур. Можно надеяться, что изучение соответствующей последовательности ионограмм данного вида на основе траекторных расчетов расширит список геофизических характеристик и, соответственно, позволит построить непротиворечивую модель исследуемой ионосферной неоднородности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Авдюшин С.И., Данилкин Н.П., Котонаева Н.Г., Арманд Н.А., Салихов Р.С., Боярчук К.А. Опыт и ре-

зультаты радиозондирования ионосферы с борта орбитального космического комплекса МИР в свете использования малых космических аппаратов на низких орбитах // Космонавтика и ракетостроение. № 3 (40). С. 9–17. 2005.

- Барабашов Б.Г., Вертоградов Г.Г. Расчет максимальных применимых частот КВ линий связи с учетом магнитного поля Земли // Радиотехника. Т. 36. № 12. С. 35–37. 1981.
- Данилкин Н.П., Журавлев С.В., Ахмедшин Р.Л., Киселев Г.Н., Небузданов А.А., Семейкин А.П., Тольский К.Л. Результаты первой научной экспедиции в приполюсном районе на атомном ледоколе “Сибирь” // Ионосферные наблюдения / Ред. Чилингарова и Крутских Б.А. Л.: Гидрометиздат. С. 100–116. 1990.
- Данилкин Н.П., Журавлев С.В., Морозова Л.П., Погорелов В.И., Тольский К.Л. Тонкие стенки неоднородностей ионизации в полярной ионосфере, обнаруживаемые методом спутникового радиозондирования // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 31. № 1. С. 137–142. 1991.
- Данилкин Н.П., Журавлев С.В., Морозова Л.П., Погорелов В.И. Поперечное сечение неоднородностей ионизации типа “стенок” в высокоширотной ионосфере // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 35. № 4. С. 173–175. 1995.
- Данилкин Н.П., Котонаева Н.Г. Интерпретация и обработка ионограмм радиозондирования ионосферы со сверхнизких орбит // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 1. С. 74–87. 2009.
- Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 116 с. 1971.
- Calvert W., Schmid S.V. Spread-*f* Observations by the Alouette Topside Sounder Satellite // J. Geophys. Res. V. 69. № 9. P. 1839–1852. 1964.
- King J.V., Legg A.J., Smith P.A. Observations of spread ionization in the topside of the ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 29. № 11. P. 1373–1381. 1967.